

# 타이어 보강용 고 탄소강 미세 강선의 굽힘 피로 성질에 미치는 미세 조직의 영향

양요셉<sup>1</sup>, 임승호<sup>2</sup>, 반덕영<sup>2</sup>, 박찬경<sup>#</sup>

## The Effects of Microstructural Parameters on Bending Fatigue Properties of Heavily Drawn Pearlitic Steel Filaments used for Automotive Tires

Y. S. Yang<sup>1</sup>, S. H. Lim<sup>2</sup>, D. Y. Ban<sup>2</sup> and C. G. Park<sup>\*</sup>

### Abstract

Influences of microstructure on high-cycle fatigue (HCF) limit of high carbon (> 0.7 wt. %) steel filaments used for tires have been investigated. A series of the fatigue tests was carried out depending on carbon content by using Hunter-type tester at a frequency of 60 Hz at a tension/compression stress of 900 to 1500 MPa. Microstructural changes of the filaments were identified in the lateral direction by using transmission electron microscopy (TEM). It was found that the mechanical properties, such as fatigue limit and tensile strength, were improved with increasing carbon content, which was mainly attributed to decreased lamellar spacing and cementite thickness. However, the fatigue ratio, which is defined as the ratio of the fatigue limit to the tensile strength, was reduced in a higher carbon range of 0.8 to 0.9 wt.%, while the fatigue ratio was nearly constant in a lower carbon range of 0.7 to 0.8 wt.%. Overall mechanical properties of the filaments, depending on carbon content, have been discussed in terms of the microstructural parameter change of lamellar spacing and cementite thickness. In addition, the variation of cementite morphology on the fatigue crack propagation of high carbon (0.9 wt. %) filaments will be discussed.

**Key Words:** Bending Fatigue, Fatigue Ratio, Pearlitic Steel Filaments, Hunter Rotating fatigue machine, Transmission Electron Microscopy (TEM)

### 1. 서 론

최근 전 세계적으로 환경에 대한 관심이 증가되고 환경오염에 대한 각종 규제가 이루어지면서 에너지 절감을 위한 소재 경량화 연구가 꾸준히 증가하고 있다. 이에 대한 노력의 일환으로 자동차 산업에 있어서 자동차 부품의 경량 금속으로의 대체와 타이어 보강재의 고강도화를 통한 경량화가 동시에 진행되고 있다.<sup>(1)</sup> 타이어에 사용되는 나이론, 아라미드 등의

기존 섬유 보강재는 뛰어난 연성 특성을 보임에도 불구하고 타이어 내에서 적층 방법에 의한 카카스 부분의 부피 증가 및 주행 중 타이어 온도 향상으로 인한 강도 저하 등의 문제점이 발생하였다. 이를 해결하기 위해, 높은 가공 경화율을 나타남과 동시에 3000 MPa 이상의 인장 강도를 나타내는 고 탄소강(0.4~0.9 %)을 소재로 한 스틸코드로 점차 교체되었다.<sup>(1,2)</sup> 스틸코드를 구성하는 미세 강선의 강도, 연성 및 피로 특성 등의 기계적 특성 향상은 신선 가공량

1 포항공과대학교 신소재공학과

2 고려강선㈜ 기술연구소

\* 포항공과대학교 신소재공학과 cgpark@postech.ac.kr

및 탄소 함량의 증가, 열처리 기술의 향상, 새로운 합금원소 첨가에 의해 시도되었으나 초석 세멘타이트의 입계 생성, 미세 마르텐사이트의 편석 및 delamination 등의 기계적 특성 저하 인자 생성으로 신선 가공량과 탄소 함량을 증가시켜 기계적 특성을 증가시키는 방향으로 연구가 이루어지고 있다.<sup>(3)</sup> 미세 강선의 강도는 가공량과 탄소 함량에 절대적으로 의존하는 것으로 알려져 있다. 가공 량에 있어서 강도 특성이 직선적으로 증가하는 페라이트와<sup>(4)</sup> 다르게 동일한 조건에서 지수 함수적으로 증가하여<sup>(4-6)</sup> 높은 특성을 보여준다. 또한, 탄소 함량에 있어서, 강도 특성이 선형적으로 증가하며 이는 세멘타이트 두께 증가에 따른 펄라이트 층간 간격의 감소에 의해 강도 특성이 증가한다는 실험적 결과 및 이론으로부터 설명되어진다.<sup>(5,6)</sup> 그러나 강도와 미세조직의 상관관계는 기존의 이론으로부터 설명됨에도 불구하고, 주행 중 굽힘 피로 (fatigue) 환경을 갖는 타이어 내부에서 미세강선의 피로 특성 및 이의 특성에 영향을 미치는 미세조직 인자 고찰 연구는 미흡하다.

그러므로 본 연구에서는 미세 강선의 피로 특성과 미세 조직의 상관 관계에 대해 고찰해보고자 한다. 이를 위해 탄소 함량에 변화를 주어 미세조직을 제어한 후 미세 강선의 피로 특성에 영향을 미치는 미세 조직 인자의 영향을 관찰 하였다.

## 2. 실험 방법

본 연구에서는 현재 타이어의 보강재로 사용되는 탄소 함량을 기준으로 0.72% (NT), 0.82% C (HT) 및 0.92% C (SHT) 등 3 가지 미세 강선을 제조하였으며 화학 조성은 표 1 에 나타내었다.

Table 1. Chemical composition of the high carbon pearlitic steels (wt.%)

	C	Cr	Si	Mn	S	P	Fe
NT	0.72	-	0.23	0.26	0.005	0.008	Bal.
HT	0.82	-	0.22	0.25	0.009	0.007	Bal.
SHT	0.92	0.2	0.24	0.26	0.003	0.007	Bal.

열처리와 신선 조건은 동일하게 적용하였으며 2 번의 열처리 (lead patenting, 570° C) 와 3 번의 신선 가공을 하였다.

미세 강선의 기계적 특성을 평가하기 위해 인장 실험과 굽힘 피로 (bending fatigue) 실험을 수행하였다. 인장 실험은 표점 거리 200 mm 시편을 사용하여,  $3 \times 10^{-3}$ /s 의 변형 속도로 실시하였다. 굽힘 피로 실험은 일반적인 피로 시험기로는 정확한 평가가 어렵기 때문에 선재의 굽힘 피로 시험이 가능하도록 고안된 헌터 피로 시험기 (Hunter rotating fatigue machine)를 사용하였다. 타이어 내부 조건과 유사하게 모사하기 위하여 온도, 습도 및 주파수를 25 ° C, 23 % 및 60 Hz 로 유지 시켰다

미세 조직 분석은 투과 전자 현미경 (JEOL 2010 FE)을 이용하여 수행되었고, 이를 통해 펄라이트 층간간격, 세멘타이트 두께, 분율 등의 미세구조를 측정하였다. 펄라이트 층간간격은 세멘타이트가 수직으로 배열된 조직을 선택하여 linear intercept 방법에 의해 측정하였으며 세멘타이트 두께는 O' Donnelly<sup>(7)</sup>의 결과를 이용하여 계산하였다.

## 3. 실험 결과

### 3.1 기계적 특성

미세 강선의 탄소 함량 변화에 따른 기계적 특성을 그림 1 에 나타내었다. 그림 1(a)에서 알 수 있는 바와 같이 탄소 함량이 0.72 %에서 0.92 %로 증가함에 따라 고 탄소강 극 세선의 인장 강도 ( $\sigma_{TS}$ )는 3176 MPa 에서 3744 MPa 로 점차적으로 증가하였다. 이는 합금 원소인 탄소

함량이 항복 강도와 인장강도에 영향을 미치며 탄소 함량 증가에 따라 강도가 향상됨을 의미한다. 그림 1(b)는 굽힘 응력 상태에서 고 탄소강 극 세선의 응력 진폭과 파단 수명과의 관계를 S-N 선도로 나타낸다. 인장-압축응력이 반복적으로 작용하는 피로 실험 시 피로 한도 (fatigue limit,  $\sigma_{FL}$ )는 타이어 파단 수명과 동일한 시간인  $10^6$  회에서 결정하였다. 피로 수명은 그림 1(a)의 인장 강도 결과에서와 같이 탄소 함량의 증가에 따라 증가하였으나, 피로 수명의 시간 강도에 대한 의존도는 응력 크기에 따라 차이를 나타내었다. 표 2 는 그림 1 의 기계적 특성을 정량적으로 분석한 결과이다. 표 2 의 정량 분석 결과

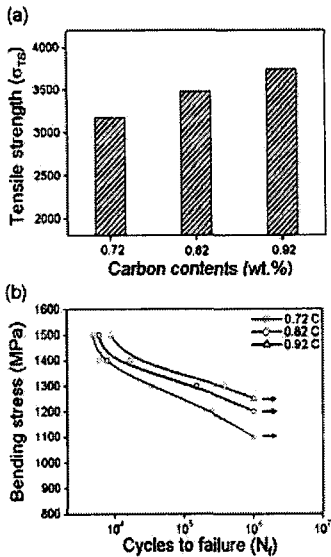


Fig. 1. The mechanical properties of the high carbon pearlitic steel filaments : (a) Tensile strength and (b) bending stress vs. numbers of cycle to failure

에서 명확하게 알 수 있는 바와 같이 탄소 함량의 증가에 따라 인장강도는 선형적으로 증가하였으며, 피로 한도 또한, 인장 강도의 증가에 따라 증가하였다. 이러한 결과는 고 탄소 강관 등의 벌크재의 피로 특성과 같이 미세 강선의 피로 특성 또한 인장 강도와 밀접한 연관성을 가짐을 나타내며, 탄소 함량 및 신선 가공 변형량 증가를 통한 인장 강도의 향상이 고 탄소 극 세선의 피로 한도 향상에 효과적인 수단이 될 수 있는 것으로 판단하였다. 또한,  $\sigma_{FL}/\sigma_{TS}$  로 정의되는 피로 내구비 (endurance ratio)는 기존에 보고 된 선재의 피로 내구비에 대한 결과와 다른 경향을 나타내는 것으로 미루어 강도와 피로 특성의 상관관계에 대한 연구가 시급한 것으로 사료 된다.<sup>(8,9)</sup>

Table 2. Results of mechanical properties and microstructural parameters depending on carbon content

C (wt.%)	$\sigma_{TS}$ (MPa)	$\sigma_{FL}$ (MPa)	$\sigma_{FL}/\sigma_{TS}$	$\lambda_p$ (nm)	$t_c$ (nm)	$V_c$ (%)
0.72	3176	1100	0.346	16.44	1.77	10.8
0.82	3480	1200	0.345	13.49	1.66	12.3
0.92	3744	1250	0.333	11.55	1.54	13.8

### 3.2 미세조직

그림 2 는 선 방향 (longitudinal section)에서 관찰된 미세강선의 탄소 함량 증가에 따른 미세 조직 사진이다. 그림 3(a)~(c)에서 보듯이 신선 가공 방향인 [001] 방향으로 펄라이트 조직이 재배열되어 펄라이트 층간간격이 수 나노 크기로 미세해진 것을 확인하였다. 신선 가공량  $\epsilon=0.5$  이하에서 관찰되는 불규칙한 펄라이트는  $\epsilon=1.2$  이상으로 신선 가공량이 증가함에 따라 재배열이 완료 된다고 보고되어 있어<sup>(10)</sup>, 본 연구에서의 펄라이트는 재배열이 완료된 조직으로 판단 할 수 있었다. 이러한 재배열 현상은 탄소 함량에 관계없이 동일하였으며, 분절된 형태의 세멘타이트도 관찰되지 않아 그림 1 에서 나타난 기계적 특성의 변화는 펄라이트 형상에 거의 영향을 받지 않는 것으로 판단되었다. 탄소 함량 증가에 따른 변화된 펄라이트 층간 간격 ( $\lambda_p$ ), 세멘타이트 두께 ( $t_c$ ) 및 볼륨 ( $V_c$ ) 등 미세조직 인자의 측정 결과를 정량적으로 표 2 에 나타내었다.

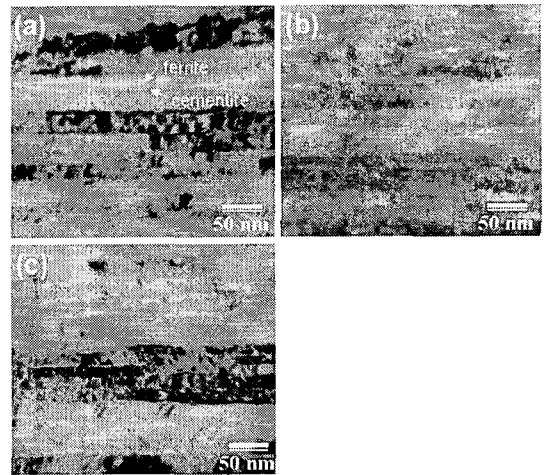


Fig. 2. TEM micrographs showing microstructure of the high carbon pearlitic steels depending on carbon contents on longitudinal sections : (a) 0.72 wt. % C and (b) 0.82 wt. % C and (c) 0.92 wt. % C

탄소 함량이 증가함에 따라 펄라이트 층간 간격은 16.44 nm 에서 11.55 nm 로 점차 감소하였다. 세멘타이트 두께 역시 1.77 nm 에서 1.54 nm 로 소폭 감소하였으나, 세멘타이트

볼륨은 이와 다른 약 10%에서 13%로 점차적으로 증가하는 경향이 관찰되었다. 이러한 미세 조직 인자의 변화는 신선 가공량과 세멘타이트의 분해 현상의 영향으로 설명할 수 있다.<sup>(4-6, 11)</sup> 이러한 현상은 탄소 함량이 증가함에 따라 고용된 탄소의 생성 및 확산 속도가 증가하여 전체적으로 펄라이트가 빠르게 생성하기 때문이다. 그러나 가속한 신선 가공 조건에서, 페라이트와 세멘타이트는 소성 거동을 하며 이로 인해 펄라이트 층간간격은 감소된다. 또한, 탄소 함량이 증가함에 따라 세멘타이트의 탄소 원자와 계면에 존재하는 전위의 결합 빈도수가 증가하여 페라이트 내부로 탄소가 재고용<sup>(7)</sup> 되는 현상이 발생하여 세멘타이트 두께는 감소되는 것으로 사료된다. 따라서 미세 강선의 미세조직 특성은 탄소 함량과 신선 가공량 모두에 의해 크게 영향을 받는다는 것을 확인하였다.

#### 4. 고찰

그림 3은 미세 강선의 탄소 함량에 따른 기계적 특성과 펄라이트 층간 간격의 상관 관계를 나타낸다. 탄소 함량의 증가는 펄라이트 층간간격을 감소 시켰으며, 이것은 인장 강도 및 피로 한도의 효과적인 향상으로 이어졌다. 이러한 결과는 탄소 함량이 0.72%에서 0.92%로 증가함에 따라 변화하는 고 탄소강 극 세선의 인장강도가 미세조직 인자 중 특히 펄라이트 층간 간격에 크게 영향을 받는다는 것을 의미하며 이는 기존의 연구 결과와 부합됨을 알 수 있었다.<sup>(5,6)</sup>

미세 강선의 피로 한도 또한 탄소 함량이 0.72%에서 0.92%로 변화함에 따라 점차 증가하였고, 이는 펄라이트 층간 간격의 감소에 의한 증가 현상으로 판단 할 수 있다. 피로 환경에서 다수의 미소 균열 (microvoids)은 응력이 집중되는 페라이트와 세멘타이트의 계면 또는 취약한 세멘타이트에 형성되고, 미세 균열끼리의 결합 (coalescence)에 의해 전파된다. 미세한 펄라이트 층간 간격은 균열의 전파를 방해하고 이로 인하여 피로 특성은 향상되는 것으로 판단된다. 그러므로 피로 한도에 영향을 미치는 인자는 인장강도의 경우와 마찬가지로 펄라이트 층간 간격으로 유추해 볼 수 있다. 그러므로 피로 한도에 영향을 미치는 인자

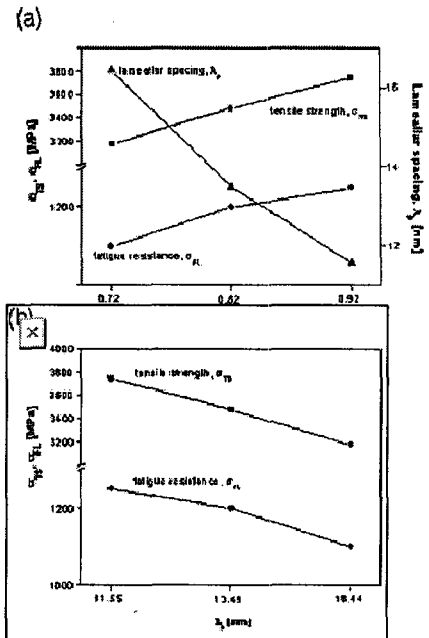


Fig. 3. Mechanical properties of the high carbon pearlitic steel filaments depending on (a) the carbon content and (b) lamellar spacing

는 인장강도의 경우와 마찬가지로 펄라이트 층간 간격으로 유추해 볼 수 있다. 그러나 내구비율 ( $\Delta \sigma_{FL} / \Delta \sigma_{TS}$ )은 탄소 함량 범위 (0.72%~0.92%)에 걸쳐 동일하지 않고 차이가 나타남을 그림 4를 통해 확인하였다. 저 탄소 함량 범위 (0.72%~0.82%)에서는 내구비율이 0.33 값을 나타낸 반면 고 탄소 함량범위(0.82%~0.92%)에서는 그 보다 적은 0.19 값을 나타내었다. 이러한 내구비율의 저하는 펄라이트 층간 간격 저하에 의한 현상으로 설명되지 못한다. 그러므로 본 연구에서는 피로 한도에 영향을 미치는 인자로 세멘타이트의 특정 입계 두께의 존재로 판단하였다. 탄소 함량이 증가함에 따라 세멘타이트의 두께는 1.77 nm에서 1.54 nm로 소폭 감소되었다. 즉, 펄라이트 층간 간격이 충분히 미세함에도 불구하고 나노 크기의 세멘타이트는 전파되는 균열을 저지하지 못하여 내구비율이 감소되는 것으로 사료된다. 그러므로 미세 강선의 피로 한도에 영향을 미치는 중요 미세조직 인자는 펄라이트 층간 간격과 세멘타이트 두께이며, 두 인자의 상호 작용에 의해 피로 한도가 결정되는 것으로 판단하였다.

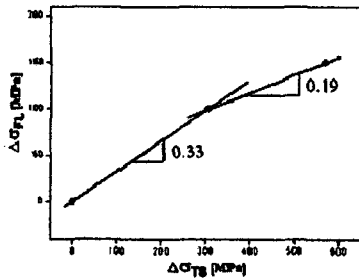


Fig. 4. The relationship between increase in tensile strength and that in fatigue limit

### 5. 결론

본 연구에서는 고 탄소강 미세 강선의 탄소 함량 변화에 따른 피로 특성과 이에 영향을 미치는 미세 조직 인자를 고찰하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 탄소 함량이 0.72 %에서 0.92 %로 변화됨에 따라 펄라이트 층간 간격과 세멘타이트 두께는 가혹한 신선 가공량과 세멘타이트의 분해 현상에 의해 점차 감소한 반면, 세멘타이트 볼륨은 탄소 확산 증가로 인한 펄라이트 형성 속도의 향상으로 인해 증가되었다.

2. 인장 강도와 피로 한도는 펄라이트 층간 간격의 감소에 따라 선형적으로 증가되어 펄라이트 층간 간격에 크게 영향을 받는 것으로 관찰되었다. 그러나 탄소 함량이 증가됨에 따라 내구비율

이 감소되는 것으로 미루어 세멘타이트 두께에 의해서도 영향을 받는 것으로 판단하였다.

### 후 기

본 연구는 TrefilARBED Korea 의 고 탄소강 극 세선 시편 제조와 한국 산업 기술 재단의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다

### 참 고 문 헌

- (1) N.N.Bekaert: Bekaert Steel Cord Catalogue (Trans Tech Publications, Belgium 1985) Ik
- (2) V.Alexandrov, A.Dubravina, R.kilmametov, U.Kazykhanov, and Z.Valiev: Met. Mater. - Int., Vol. 9, (2003), p. 151
- (3) Ochiai, Seiki Nishida and Hitoshi Tashiro: Wire Journal International, Dec. (1993), p. 50
- (4) G.Langfrod, P.N.Nagata, R.J.Sover and W.C.Lesile : Metal. Trans., Vol. 3, (1972), p.1843
- (5) G. Labdfrod : Metal. Trans., 1A, (1970), p.465
- (6) J.D.Embury and R.M.Fisher: Acta Metall., Vol. 14, (1966), p.147
- (7) V.N.Grieve and V.G.Gavrilyuk: Phys. Metals., Vol. 4, (1982), p.531
- (8) B.E.O'Donnolly, R. L. Reuben, and T. N. Baker: Met. Tech., Vol. 11, (1984), p.45
- (9) Osamu UMEZAWA and Kotobu NAGAI: ISIJ International, Vol. 37 (1997), p.1170
- (10) Fatigue Design Hand book: SAE, (1968), p.42
- (11) V.K.Chandhok, A.Kasak and J.P.Hirth: Trans. ASM., 59, (1966)